UE MEMS
TP 1 - TD
Etude d'un résonateur mécanique avec interface électrostatique

Dimitri Galayko

1 Introduction

Ce TP permet d'appliquer la théorie des résonateurs et des transducteurs capacitifs que nous avons vu en cours, à la modélisation de ces systèmes. Ici, on modélisera un résonateur/transducteur de différéntes géométrie, afin de tester le comportement du système dans différentes configurations. On comparera les résutats de ce modélisation avec les prédictions de la théorie présentée en cours.

On utilisera l'environnement de Mentor Graphics appelé AdvanceMS, qui permet de faire de construire des modèles hétérogènes mélangeant les descriptions au niveau Spice (Eldo), VHDL, Verilog, VHDL-AMS, VerilogA. On utilisera Eldo pour décrire les circuits électriques, et VHDL-AMS pour décrire les composants MEMS.

2 Utilisation de l'environnement

Pour utiliser l'environnement, il faut accomplir les actions suivantes :

– créer un répertoire de travail (par ex., *TP1*),

– copiez y le contenu de l'archive .zip fourni par l'enseignant,

– dans un terminal, mettez vous dans ce répertoire. Toutes les commandes sont à exécuter à partir de ce répertoire.

– Lancez le script de configuration avec la commande :

source ~mentor/ams.2010_2b.csh

Pour compiler/simuler, vous avez besoin d'exécuter 4 commandes :

– *valib TP_MEMS* : crée une bibliothèque nommée TP_MEMS pour vos modèles,

– *vasetlib TP_MEMS* : définit TP_MEMS comme bibliothèque de travail. Par défaut, elle contiendra les nouveaux modèles compilés.

– *vacom modele.hdl* : compile le modèle VHDL-AMS contenu dans le fichier avec extension .hdl. Pour compiler tous les modèles se trouvant dans le répertoire, vous devrez lancer

*vacom *.hdl*

Chaque fois que vous modifiez le modèle VHDL-AMS, il faudra le recompiler.

– *vasim&* : lancement de l'environnement de simulation.

Votre environnement est prêt. Voici quelques remarques concernant l'utilisation de cet environnement.

– Le modèle du système complet est composé de deux types de fichiers : un fichier Eldo, avec extension .cir, et un ou des fichiers .vhd contenant les modèles VHDL-AMS.

– Les modèles VHDL-AMS doivent être compilés après chaque modification. Les fichiers .cir sont directement interprétés par le logiciel *vasim*.

– Chaque fois que vous modifiez vos modèles, il faut recharger (*reload*) le modèle.

– C'est le fichier eldo (.cir) qui contient la description de plus haut niveau (le niveau *top*).

La documentation. La plate-forme AdvanceMS est abondamment documentée. Toute la documentation se trouve dans le répertoire :

/users/soft/mentor/ams/ixl.2010_2b/docs/

Dans ce répertoire, il y a des sous-repertoires *htmldocs* et *pdfdocs*, qui contient la même documentation sous forme de .pdf ou une archive .html. Il peut être pratique de naviguer dans une arborescence .html, pour cela, dans le répertoire correspondant, il faut chercher le fichier *index.html* et l'afficher avec le navigateur.

Les fichiers .pdf (ou les répertoires archives html) qui vous seront utiles sont :

eldo_user.pdf - manuel d'utilisateur Eldo, avec beaucoup d'informations sur les bases d'utilisation d'Eldo,

eldo_ref.pdf - manuel de référence sur les commandes Eldo

vhdlams_qr.pdf - référence sur le langage VHDL-AMS

adms_user.pdf - manuel d'utilisateur de l'environnement AdvanceMS

adms_ref.pdf - manuel de référence sur l'environnement AdvanceMS.

3 Transducteur capacitif à peignes interdigitées, à mouvement latéral

Dans cet exercice, on modélisera un résonateur associé à un transducteur à peignes interdigitées à mouvement latéral. Le transducteur a une géométrie donnée sur le dessin fig. 1, avec les paramètres suivants : N=100 (nombre de capacités), l=100μm, d=5 μm. L'épaisseur de la structure (dans le sens perpendiculaire à l'écran) est de 100 μm.

Notez que les butées sont prévues, afin de limiter le déplacement de la partie mobile.

Le résonateur : La raideur du transducteur modélisé par la méthode d'éléments finis (k) est de 100 Nm^{-1}, la fréquence de résonance mesurée est 400 kHz. Le facteur de qualité mesuré est de 1000.

3.1 Préparation

1) Calculez le facteur de transduction du transducteur, et, d'après le dessin, donnez les limites du déplacement de la partie mobile.

2) Ecrivez l'expression reliant la force générée par le transducteur avec la tension de polarisation.

3) Est-ce que cette force dépend du déplacement de la masse mobile ?

4) Ecrivez l'expression donnant la position d'équilibre de la masse mobile d'un transducteur polarisé en fonction de la tension de polarisation. Quelle tension maximale peut-on appliquer ?

3.2 Travail pratique

Paramétrez le fichier .cir pour modéliser le système décrit plus haut.

1) Faites une simulation transitoire en appliquant au transducteur une polarisation de 50 V. Observez la réponse transitoire dans le domaine mécanique (le déplacement, la vitesse) et dans le

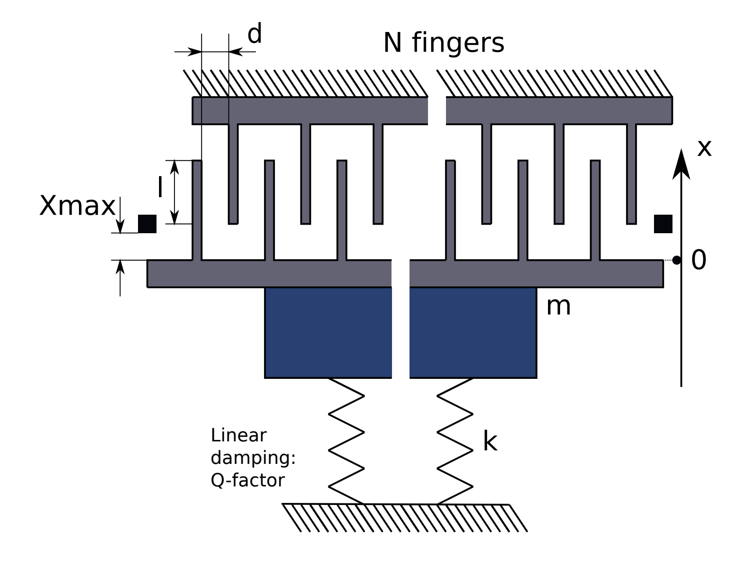


FIGURE 1 –

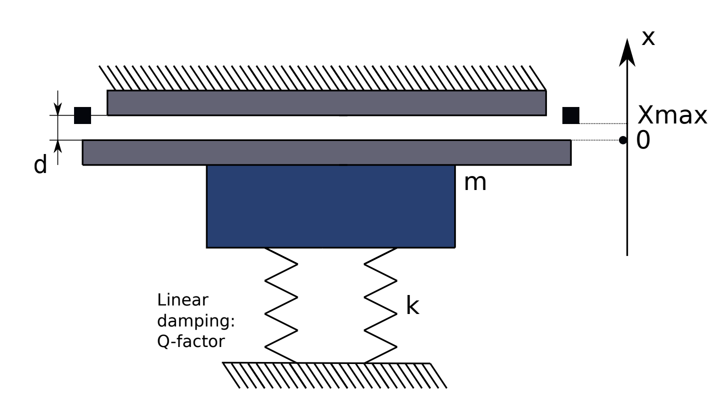


FIGURE 2 –

domaine électrique (le courant à travers la source de polarisation). Comparez avec les valeurs du coefficient de transducteur et de la position d'équilibre calculées plus haut.

2) Superposez à la source de polarisation au transducteur une tension sinusoïdale d'amplitude 0.1 V, à fréquence de résonance du résonateur. Observez les amplitudes du courant à travers le transducteur et l'amplitude du mouvement mécanique de la masse mobile.

3) Effectuez une simulation AC (linéarisé petit signal) dans la plage de fréquence 1-10000 Hz, 1000 points par décade, et affichez :

– l'amplitude des vibrations mécaniques
– l'amplitude du courant de transducteur,
– l'impédance électrique vue des électrodes du transducteur

4 Transducteur à rapprochement des plans

La géométrie du transducteur à rapprochement des plans (à mouvement vertical) est donné fig. 2.

Les paramètres du transducteur sont les suivants : d=1μm, S=100×100μm^2, la tension de polarisation est de 20 V.

On comprends qu'un tel transducteur autorise des déplacements bien plus faibles (pas plus que

la largeur du gap d !). Ainsi, on l'utilise avec un résonateur un plus raide :

La raideur du transducteur modélisé par la méthode d'éléments finis (k) est de 500 Nm^{-1}, la fréquence de résonance mesurée est 100kHz. Le facteur de qualité mesuré est de 1000.

On va faire une analyse similaire, mais dans un ordre légèrement différent.

4.1 Préparation

1) Calculez le facteur de transduction du transducteur pour la polarisation nominale.

2) Ecrivez l'expression reliant la force générée par le transducteur avec la tension de polarisation.

3) Est-ce que cette force dépend du déplacement de la masse mobile ?

4) Estimez la position d'équilibre de la masse mobile pour lorsque le transducteur est polarisé à la tension nominale.

5) Calculez la tension pull-in du système.

6) Calculez la raideur du ressort "électrostatique" généré par le transducteur, et calculez la fréquence de résonance qu'aura ce système.

4.2 Travail pratique

Paramétrez le fichier .cir pour modéliser le système décrit plus haut.

1) Etude du phénomène de pull-in. Dans cette partie, on étudie le phénomène de pull-in du transducteur capacitif. Pour ce faire, on applique une tension continue au transducteur associé au résonateur, et on le fait croître lentement (lentement = en comparaison avec la constante de temps caractéristique du système). On applique alors une rampe de pente lente au transducteur : cela se fait à l'aide de la fonction *pulse* associée à une source de tension sous Eldo.

Votre rampe doit partir de 0 V et aller jusqu'à 50V, et doit durer 1 seconde.

Déterminez à partir de quel niveau de tension le phénomène de pull-in se produit ? Comparez avec la valeur théorique de la tension de pull-in. Quelle est la position de la masse mobile au début du pull-in ?

2) Ajout des stoppers. Pour éviter les problèmes liés au pull-in (non-convergence des simulation, ...), on introduit les stoppeurs. Il faudra pour cela enlever les commentaires sur les bouts de code correspondant dans votre modèle .vhd, et de recompiler le modèle. Refaites la simulation avec une rampe, et constatez la différence du comportement du système. Vous verrez que lorsque le phénomène de pull-in se produit, le simulateur ne "plante" plus, mais la masse mobile reste fixée à hauteur du stoppeur.

3) Maintenant, polarisez le transducteur à tension de polarisation nominale, et faites une simulation AC, en affichant l'amplitude de déplacement du transducteur. Prenez les limites suivantes pour les fréquences d'entrée : 10k, 1000k.

Mesurez la fréquence de résonance, et comparez la avec la fréquence de résonance propre du résonateur mécanique (100kHz dans notre cas). Comparez ce résultat avec vos calculs.

4) Faites une simulation transitoire en appliquant au transducteur une polarisation de 20 V, et un tension sinusoidale d'amplitude 0.05 V à fréquence égale à la fréquence de résonance réelle du système, mesurée dans la question précédente. Observez la réponse transitoire dans le domaine mécanique (le déplacement, la vitesse) et dans le domaine électrique (le courant à travers la source de polarisation). Comparez avec les valeurs du coefficient de transducteur et de la position d'équilibre calculées plus haut.

Concluez sur la fréquence de résonance du système, et comparez avec la fréquence de résonance propre mécanique du résonateur.

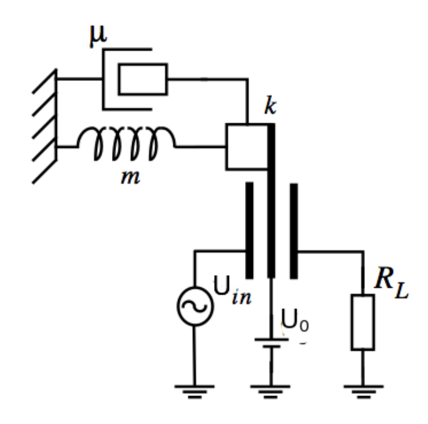


FIGURE 3 –

5 Filtre électromécanique

Modélisez le système dont le schéma est présenté fig. 3, qui inclut maintenant *deux transducteurs*, un pour l'entrée, un pour la sortie. Vous utiliserez les transducteurs à mouvement vertical, avec les mêmes paramètres que dans les questions précédentes. Vous devrez modifiez vous-mêmes le modèle VHDL-AMS du résonateur/transducteur, de sorte à ajouter une force supplémentaire générée par le deuxième transducteur.

Vous prendrez 100 kOhms pour la résistance de charge.

5.1 Cas idéal

Faites une simulation AC, et affichez la caractéristique de transfert du filtre, en prenant comme la grandeur d'entrée la tension d'entrée, et pour la grandeur de sortie la tension sur la résistance de charge.

Estimez la résistance liée au déplacement du résonateur.

5.2 Cas réel

Incluez dans votre modèle une capacité parasite de valeur 10 fF entre l'entrée et la sortie (capacité de couplage parasite). Affichez de nouveau la fonction de transfert. Concluez quant à la dégradation de la rejection du filtre.